

平成30年6月5日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04198

研究課題名(和文) 極低温ロケット上段推進系における気液二相熱伝達特性と数値的予測手法の総合的研究

研究課題名(英文) Thermal-fluid Behavior of Two-phase flows for Propellant Management in Upper Stage Propulsion System

研究代表者

姫野 武洋 (Himeno, Takehiro)

東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授

研究者番号：60376506

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,600,000円

研究成果の概要(和文)：極低温ロケットを想定した加速度環境における自由表面流を対象とし、極低温推進薬のスロッシングによって促進される界面熱伝達と相変化が引き起こす密閉容器内部の圧力変動と界面張力が卓越する微小重力環境に置かれた液体貯蔵容器あるいは少流量管路での流動特性について、実験的手法と独自の数値流体解析の両方を用いて考察し、宇宙機の推進薬管理に有用な学術的知見を獲得するとともに、定量的予測手法の構築を行った。

研究成果の概要(英文)：To establish the technology of the propellant management for liquid rocket, the pressure drop in closed vessels were intensively investigated. In the experiment, heat and mass transfer indicated by the pressure change induced by sloshing in the model-scale tank driven by the mechanical exciter were successfully obtained. Compared with the visualized motion of liquid, the enhancement of heat transfer coupled with the non-linear motion had different order of magnitude from those in the cases with linear response. The magnitude of heat flux between two phases in sloshing was found to have strong correlation with the appearance of droplets and wavy surface. Finally, non-isothermal sloshing of cryogenic fluid was investigated. Not only the motion of liquid nitrogen, but also the condensation of liquid nitrogen was successfully visualized. It was also confirmed that vapor-liquid coexistence system of single-component under non-isothermal condition was easy to change its pressure.

研究分野：航空宇宙推進学

キーワード：ロケット 極低温 気液二相流 相変化 数値流体解析

## 1. 研究開始当初の背景

人間の日常的な活動領域が地球周回軌道上まで拡大するのに伴い、宇宙活動を支える基盤技術として、低重力環境で推進薬や冷却剤などの液体を貯蔵そして輸送する技術は欠かせないものであり、今後ますます重要となる。しかし、推力や姿勢変動を伴うロケット飛翔中の動的加速度環境や、比重差による液体駆動を期待できず、界面張力の影響が顕在化する地球周回軌道上の低重力環境では、自由表面流の挙動は地上の場合と大きく異なり、液体を容器内部の望ましい位置に保持し、思い通りに容器外部へ輸送することすら難しくなる。そのため、地上での経験を頼りに設計された流体機器は、軌道上で想定した性能を発揮できず、計画通りに運用できない恐れがある。今後、軌道上で運用される流体機器の信頼性を向上させ、同時に開発コストと運用リスクを低減するためには、その設計・計画段階から作動流体の挙動を適切に予測する技術が求められる。特に、貯蔵容器や流路内部で沸騰・凝縮を伴う自由表面流を考える場合、液体の重心移動などの動力学特性に注目するだけでなく、伝熱や相変化も考慮し、共存する気体や固体との熱交換に起因する熱流動特性を把握することが重要である。

このように特殊な加速度環境での自由表面流の挙動予測と制御は、「流体管理(fluid management)」、或いは宇宙輸送系に限って「推進薬管理(propellant management)」と呼ばれる。今後、性能面で有利な極低温ロケットの打上能力向上だけでなく、現状で高々数十分に限られる運用時間を延長し、数日を超える長期間の慣性飛行とエンジンの多数回着火を伴うような、軌道間輸送にも対応できる「多用途化」を実現するには、加圧システムまでを含めた推進薬全体消費量の節約が必須となる。しかし世界的に見ても、予冷方式の実現可能性や、液体保持デバイスの得失について、極低温推進薬の熱流動特性に基づく合理的かつ定量的な評価を行うための手法は未確立である。

## 2. 研究の目的

そこで本研究では、極低温ロケットを想定した加速度環境における自由表面流を対象とし、i) 極低温推進薬のスロッシングによって促進される界面熱伝達と相変化が引き起こす密閉容器内部の圧力変動と ii) 界面張力が卓越する微小重力環境に置かれた液体貯蔵容器あるいは少流量管路での流動特性について、実験的手法と iii) 独自の数値流体解析の両方を用いて考察し、新たな学術的知見と定量的予測手法の構築を目的とした。

## 3. 研究の方法

極低温スロッシング実験では、真空断熱槽(クライオスタット)の内部に設置した小型透明の密閉容器に極低温液体と常温気体を封入し、スロッシングと温度場が連成する流れ

場を実現する。真空断熱槽を電動加振機に連結し、水平方向と鉛直方向に様々な非定常加速度を与えることで、液面変形が線型応答を呈する場合から、碎波を生じる強非線形応答を呈する場合まで、容器内部での熱交換と相変化に起因する圧力変動を計測できる。同時に、真空断熱槽の観察窓を通じて容器内部の液面挙動や液滴を高速度撮影し、加速度に駆動された自由表面流の動学的挙動と圧力変動の相関を相似則に基づいて整理するとともに、その発生機序を伝熱学的に説明することを目的とする。

微小重力環境における流動特性把握については、落下塔を用いて実現される短秒時の低重力条件を用い、宇宙機が機軸周りに回転する加速度環境を模擬したうえで、金属メッシュの界面張力を利用した液体捕獲の可能性を調査した。

自由表面流の数値解析については、高精度な界面捕獲を活かしつつ、固体伝熱とも連成した他領域計算が可能な改良を施すと共に、実験と対応した熱流動解析を試み、熱流動現象の理解と解明を試みた。

また、研究代表者らのグループが別途実施した、観測ロケットによる微小重力実験に関し、狹隘部・分岐部・屈曲部など、複雑形状を有する管路内部に少流量(低ウェーバー数)の液体窒素を通じた沸騰二相流現象の数値解析に本計算手法を提供した。

## 4. 研究成果

### 4.1 極低温スロッシング実験

極低温スロッシング実験では、図1に示すように、観察窓付の真空断熱槽(光学クライオスタット：(株)ジェック東理社製)の内部に設置した小型透明の可視化容器に極低温液体窒素と常温気体窒素を封入し、スロッシングと温度場が連成する流れ場を実現する。光学クライオスタットは高荷重電動加振機(尙旭製作所 R-3000 型)に連結し、水平方向に様々な非定常加速度を与えることで、液面変形が線型応答を呈する場合から、碎波を生じる強非線形応答を呈する場合まで、容器内部での熱交換と相変化に起因する圧力変動を計測できる。同時に、観察窓を通じて容器内部の液面挙動を高速度撮影する。

今回の実験で印加した加振波形を図2に示す。これは、再使用観測ロケットのエンジン一基故障時に想定されるタンク水平方向の加速度を、フルード数の一致に基づく相似則に従い、実機寸法から模型寸法に変換したものである。

一連の実験では、密閉容器内で相変化を伴うスロッシングによる減圧現象を対象とし、急激な動的加速度を印加した場合の液面挙動と圧力変化に注目し、液温成層の厚さに注目した実験的調査を行った。実験手順を工夫することにより、定量的な議論に適する再現性を獲得するとともに、図3に示すように、初期条件として液温成層厚さを変化させるこ



(a) 光学クライオスタットと電動加振機

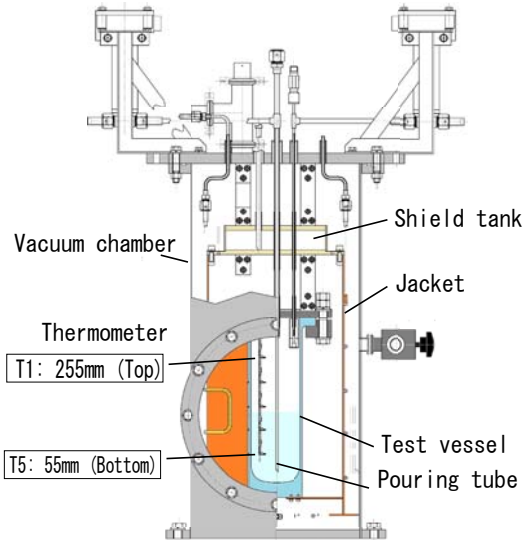


図1 極低温スロッシング実験装置

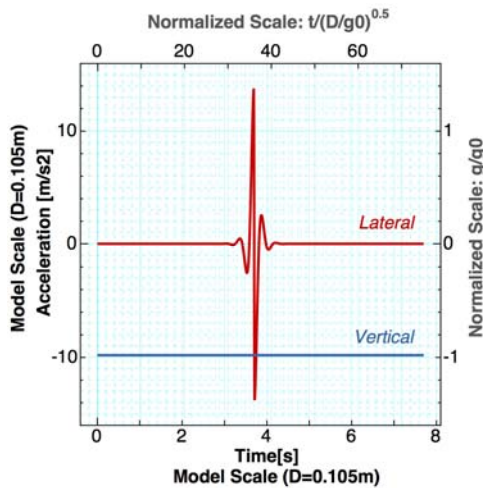


図2 印加加速度の時間履歴の例

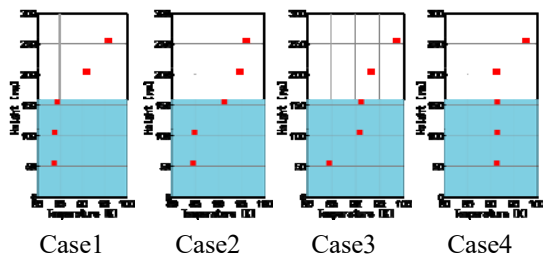


図3 初期液温分布の例

とに成功した。

まず、液温成層が最も薄いCase 1について、液面挙動と圧力変化履歴の関係を考察する。初期条件における気液界面での温度は、相平衡に従い、タンク初期圧 0.3 MPaG における窒素の飽和温度 91.3 K と仮定できる。図 3 に示した鉛直方向の液温分布と併せれば、液面とその直下の温度計との間に温度が不連続的に変化する面が存在するから、液温成層厚は 5~55 mm の範囲と読み取る。

Case 1 について、同時に観察された液面挙動と圧力変化を対応させ、時間を追って図 4 (a)~(l) に示す。加振開始後の(d)~(e)までの間、スロッシングが発生しているものの、液面形状は比較的滑らかであり、圧力降下は顕著ではない。しかしその後、液面形状が乱れ始め(f)、碎波に続く気相巻き込み(g)~(h)が発生すると、急激な圧力降下が計測された。また、(g)~(l)までの間、気相部分に黒く見える霧の発生も観察された。

このことは、スロッシングに伴う液面形状の乱れや碎波により、気液界面の面積が増大しただけでなく、気液界面の近傍に維持されていた薄い液温成層が破壊された結果、サブクール状態の液相が気相に触れ、気液間の熱伝達(気相の冷却)と相変化(気相の凝縮)が促進されたため、圧力が降下したと説明することができる。気体の凝縮が発生すると、それ以外の部分の気体は断熱的に膨張し、過冷却の状態が出現する。こうして、気液界面に触れていない気相部分でも凝縮が起こり、霧の発生が見られたのだと考えられる。

初期液温成層厚さを増した、Case 2~Case 4 を含め、各 Case について、加振開始から 1.1 秒後(時刻 4.1 sec)における液面挙動を比較して図 4 に示す。液面形状は、各 Case ともには

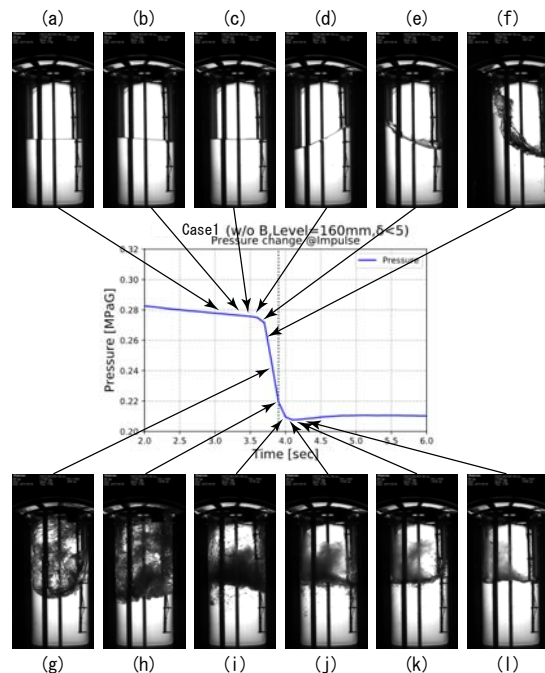
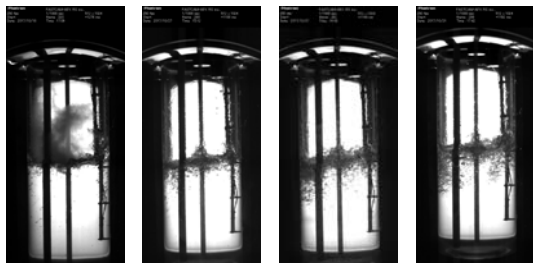


図4 液面挙動と圧力降下の相関  
液温成層が薄い場合(Case 1)





Case1 Case2 Case3 Case4

図5 液温成層厚を変化させた場合の液面挙動

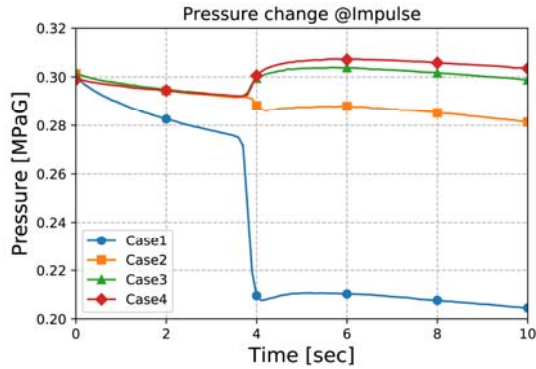


図6 液温成層厚を変化させた場合の圧力変化

ほぼ同じであるが、霧の発生がみられたのは Case1 のみであることから、Case 2~Case 4 では、気体窒素の凝縮が少なくなっていることが推察される。また、液相内部に巻込まれた気泡に注目すると、液温成層がより厚い場合ほど、液相深くまで気泡が消失せずに滞留しているのが確認できる。サブクール状態の液相に達した気泡は、熱を奪われて凝縮して消失すると考えられるから、液温成層厚の違いによってタンク内の伝熱現象に違いを生じることが示唆される。

続いて、圧力変化の履歴を比較して図5に示す。液温成層が一定以上の厚みを持つ場合、圧力降下は抑制される傾向が確認できる。Case 3 および Case 4 では、むしろ圧力が上昇した。また、圧力が降下した Case 1 および Case 2 においても、圧力降下の直後に、わずかなではあるが圧力が回復することが計測された。

これらの観測事実を総合すると、液温成層を伴うサブクール液のスロッシングに伴う圧力降下について、次のように理解できる。

液温成層が薄い場合には、スロッシングに伴ってサブクール液相が容易に気相側へ露出し、気相の冷却と凝縮が促進された結果、顕著な圧力降下が発生する。急激な圧力降下の後、一時的に加熱状態となった液温成層で液相の蒸発が発生するため、やや遅れて圧力が、僅かではあるが、回復する。液温成層が厚い場合には、サブクール液相は気相側に露出しにくく、気相の冷却も促進されにくいため、圧力降下が生じにくくなる。液体ロケット推進薬タンクの圧力制御を検討する際には、液面挙動だけでなく、液相内部の温度分

布を把握することが極めて重要である。

#### 4.2 落下塔実験

落下塔実験では、低重力環境で回転に伴う外乱加速度を受ける環境における、容器内液面挙動観察実験を実施した。

具体的には、図7に示す、(株)植松電気の微小重力落下塔を用い、 $10^{-3}G$ 以下を約2.5秒間持続する微小重力環境を獲得した上で、図8に示す落下筐体、図9に示すような、鉛直軸(ロール軸)にむ対する回転ステージを搭載し、鉛直方向加速度がほぼ消失した環境で、



図7 落下塔

図8 落下筐体

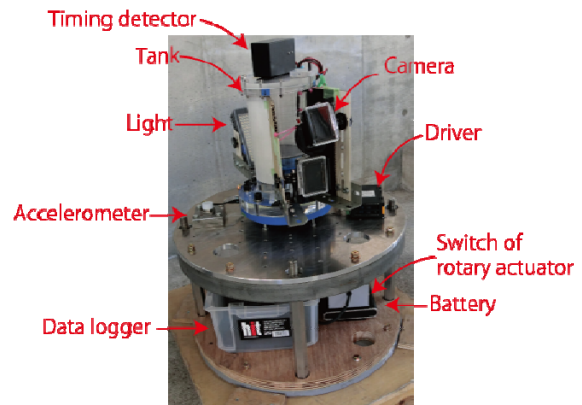
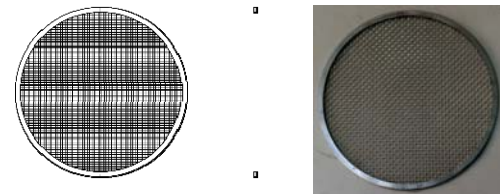
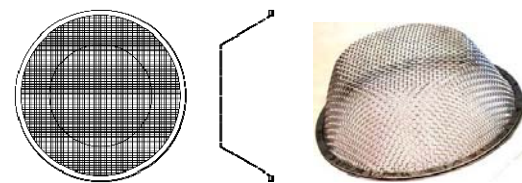


図9 回転ステージと供試体容器

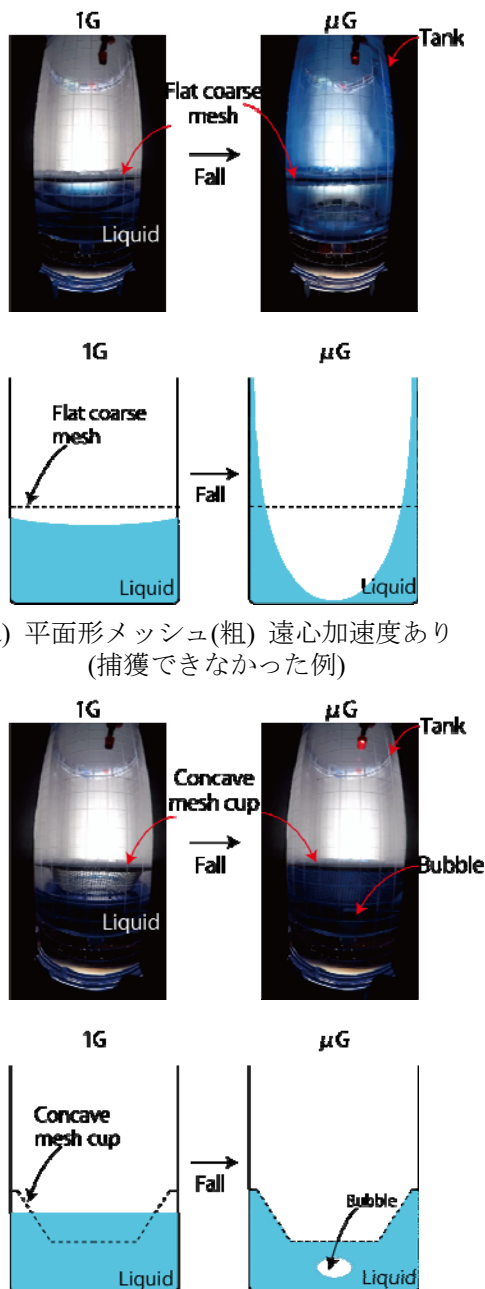


(a) 平面形メッシュ(粗)



(b) カップ形メッシュ(粗)

図10 金属網による液体捕獲デバイスの例



(a) 平面形メッシュ(粗) 遠心加速度あり (捕獲できなかった例)

(b) 平面形メッシュ(粗) 遠心加速度あり (捕獲できた例)

図 11 金属網による液体捕獲実験結果

回転に伴う遠心方向加速度を供試体に与えることができた。

実験では、遠心加速度と表面張力の比で表される無次元数であるボンド数をパラメータとした。供試体としては、単純円筒容器の場合に加え、図 10 に示すような、様々な形状の金属網(メッシュスクリーン)による液体捕獲デバイスを追加装着した場合についても実験を行った。

結果の一例を図 11 に示す。実験からは、供試液体の表面張力係数と金属網のメッシュ幅により算出されるボンド数を指標として、液体捕獲の成否が概ね整理できること、ならびに、金属網開口比の影響も受けることなど、定量的な知見を得ることができた。

#### 4.3 自由表面流数値解法

自由表面流の数値解析についても、様々な流れへの適用実績がある CIP-LSM コードを基礎として、複雑形状流路に対応した多領域計算、相変化モデル等の高度化を行った。また、計算コードの高速化については、宇宙航空研究開発機構の助言と作業支援を得て、並列化を施した。

改良された計算コードを適用し、時間的に変化する動的加速度環境が、管内気液二相流の流動様式に与える影響を調べた。図 12 に示すように、表面張力支配から体積力支配の流動場への遷移を安定に模擬することに成功し、同時に、流れ方向の圧力損失が変化することを確認した。

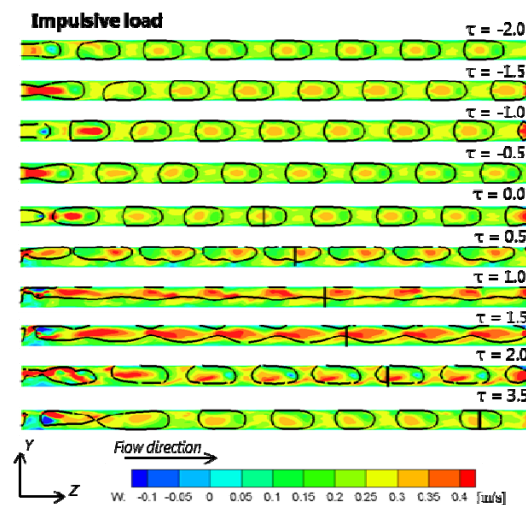


図 12 動的加速度環境における管内気液二相流の流動様式遷移

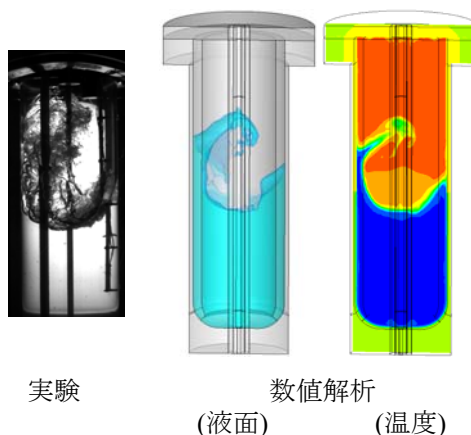


図 13 極低温スロッシング模擬

加えて、固体壁面上での沸騰モデルを実装し、通常重力環境(1.0G)と低重力環境(0.1G)の静的加速度環境において、単純形状を有する容器内部においてプール沸騰が安定に模擬できた。また、図 13 に示すように、極低温スロッシング実験に対応した数値的模擬を行った。数値解析により実験結果を模擬する試行を通じ、固気液界面における適切な

熱伝達モデルと相変化モデルを考案した。

なお、一連の研究を通じて改良された本数値解法は、国内の宇宙輸送機研究機関と開発メーカーに技術移転され、実機環境での推進薬供給系の現象予測に役立てられている。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計4件)

- ① 姫野 武洋, 熊谷 剛彦, “減圧環境における上昇気泡の数値解析”, 日本鉄鋼協会論文集「鉄と鋼」, Vol.101, No.2 (2015), pp.109-116.
- ② 熊谷 剛彦, 岸本 康夫, 中村 修, 田川 俊夫, 姫野 武洋, 嶋崎 真一, “減圧密閉容器内を上昇する気泡の観察”, 日本鉄鋼協会論文集「鉄と鋼」, Vol.101, No.2 (2015), pp.93-99.
- ③ C. Inoue, J. Kouwa, T. Watanabe, T. Himeno, S. Uzawa and S. Matsuno, "Normalized Spray Flux Distribution in Impinging Atomization", Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. Vol.60, No.4 (2017), pp. 255-258.
- ④ Baber Javed, Toshinori Watanabe, Takehiro Himeno and Seiji Uzawa, "Effect of Trailing Edge Size on the Droplet Distribution Downstream of the Blade". Journal of Thermal Science and Technology, Volume 12, Number 2 (2017) pp.JTST0031.

[学会発表] (計9件)

- ① N.Takeda, T.Himeno, Y.Umemura, T.Watanabe, “Numerical Simulation on Unsteady Cavitation by Direct Interface Tracking Approach”, ISTS-2015-a-35, Proceedings of 30th International Symposium on Space Technology and Science, Kobe, July 4-10, 2015.
- ② W.Sarae, K.Kinefuchi, Y. Umemura, D.Yabusaki, D.Sugimori, T.Fujita, K.Okita, H.Kobayashi, T.Himeno, T.Sato, S.Nonaka, “Sounding Rocket Experiment on Chill-down Process with Liquid Nitrogen in a Complex Channel”, AIAA 2015-4213, The 51st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, July 27-29, 2015, Orlando, FL.
- ③ Y.Umemura, T.Himeno, K.Kinefuchi, N.Tani, H. Negishi, H. Kobayashi, K. Ohira, “Numerical Modeling of Boiling Flow in a Cryogenic Propulsion System”, AIAA 2015-3855, The 51st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, July 27-29, 2015, Orlando, FL.
- ④ T.Himeno, W.Sarae, K.Kinefuchi, Y. Umemura, H.Kobayashi, S.Nonaka, “Boiling Flow of Liquid Nitrogen in Complicated

Channels under Low-gravity Condition”, No. 3124909, Space Propulsion 2016, Rome, Italy, 2-6 May 2016.

- ⑤ Y.Umemura, T.Himeno, O.Kawanami, K.Kinefuchi, H.Negishi, “Numerical Prediction of Liquid Nitrogen Line Chill-down Processes by Direct Interface Tracking Approach”, No. 3124908, Space Propulsion 2016, Rome, Italy, 2-6 May 2016.
- ⑥ S. Hamajima, T. Himeno, Y. Sakuma, T. Watanabe, Y. Umemura, H. Negishi, K. Ishikawa, S. Uzawa, “Experimental Investigation on Liquid Acquisition Devices by Mesh-type Baffles”, AIAA 2016-4773, The 52nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, July 25-27, 2016, Salt Lake City, UT
- ⑦ 岩永健太郎, 姫野武洋, 渡辺紀徳, 井上智博, 佐久間康典, 立石敦, 梅村悠, “非定常加速度環境における管内気液二相流挙動の数値解析”, 日本航空宇宙学会第53回航空原動機・宇宙推進講演会, 那覇, 2016年3月9-10日, 講演論文集(CD-ROM), No. 1B14
- ⑧ 梅村悠, 姫野武洋, 大平勝秀, 河南治, 杵淵紀世志, 小林弘明, “上段エンジン予冷予測に向けた冷却シミュレーション開発”, 日本航空宇宙学会第53回航空原動機・宇宙推進講演会, 那覇, 2016年3月9-10日, 講演論文集(CD-ROM), No. 2A01
- ⑨ A. Ohashi, Y. Furuichi, D. Haba, Y. Sakuma, S.Uzawa, T. Himeno and Toshinori Watanabe, “Experimental and Numerical Investigation on Pressure Change in Cryogenic Sloshing with a Ring Baffle”, AIAA 2017-4760, The 53rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 10-12 July 2017, Atlanta, GA

[図書] (計0件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ

<http://park.itc.u-tokyo.ac.jp/jetlab/themes/two-phase.html>

[http://www.jsme-fed.org/papertech/2013\\_11/001.html](http://www.jsme-fed.org/papertech/2013_11/001.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

姫野 武洋 (HIMENO TAKEHIRO)  
東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号 : 60376506